NOTICE

SUR LES

TRAVAUX ET TITRES SCIENTIFIQUES

DE

M. E. BOUTY,

MAITRE DE CONFÉRENCES A LA FACULTÉ DES SCIENCES
ET A L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1884

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
10417 Quai des Augustins, 55.

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX ET TITRES SCIENTIFIQUES

DE

M. E. BOUTY.

Mes titres scientifiques sont de deux espèces. D'une part, j'ai exécuté de 1873 à 1884 de nombreuses recherches expérimentales sur divers sujets d'électricité et de magnétisme. Leurs résultats, favorablement accueillis par l'Académie, ont été consignés dans les *Comptes rendus* et publiés avec plus de détails dans les *Annales de l'École Normale supérieure*, le *Journal de Physique théorique et appliquée* et les *Annales de Chimie et de Physique*. D'autre part, j'ai publié, en collaboration avec M. Jamin, la troisième édition du *Cours de Physique de l'École Polytechnique*, dont les deux éditions antérieures avaient été publiées par M. Jamin; j'ai été associé, dès l'origine, à la rédaction du *Journal de Physique* et j'en partage la direction, depuis la mort de M. d'Almeida, avec MM. Cornu, Mascart et Potier.

RECHERCHES DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE.

Les Mémoires que j'ai publiés sur divers sujets d'Électricité et de Magnétisme peuvent se diviser en trois groupes :

A. — Études sur le Magnétisme (1874-76).

B. — Phénomènes thermo-électriques, phénomène de Peltier aux surfaces de contact d'un liquide et d'un solide. Contraction des dépôts galvaniques (1879-1881).

C. — Polarisation des électrodes et conductibilité des liquides (1882-1884).

Nous allons passer en revue les méthodes employées dans ces recherches, et les principaux résultats auxquels je suis parvenu.

A. — ÉTUDES SUR LE MAGNÉTISME.

Ces études ont fait l'objet de neuf Notes présentées par M. Jamin à l'Académie des Sciences, et imprimées dans les *Comptes rendus*. Elles ont été développées dans deux Mémoires, imprimés dans les *Annales de l'École Normale supérieure*, et dont le premier a été présenté à la Faculté des Sciences de Paris comme Thèse de doctorat en 1874.

PREMIER MÉMOIRE.

Études sur le Magnétisme.

(Première Partie.)

Thèse de doctorat n° 360 de la Faculté des Sciences de Paris. — *Annales de l'École Normale supérieure*, 2e série, t. III, 1874. — Mesure du moment magnétique de très petites aiguilles aimantées, *Comptes rendus*, t. LXXVIII, p. 189. — Sur la rupture des aiguilles aimantées, *ibid.*, p. 280, et *Journal de Physique*, 1re série, t. III, p. 361. — Sur le magnétisme permanent de l'acier, *Comptes rendus*, t. LXXVIII, p. 559. — Sur l'aimantation de l'acier, *ibid.*, p. 842, et *Journal de Physique*, 1re série, t. III, p. 316.

Vers 1872, l'étude expérimentale des aimants de fer doux ou d'acier, un peu délaissée depuis les recherches de Coulomb et de Biot, a été

reprise en France et à l'étranger par un grand nombre de savants, et éclairée d'un jour tout nouveau. Il suffira, par exemple, de citer les belles recherches de M. Jamin et celles de M. Duter, en France; celles de M. Stoletow, en Russie, et de M. Rowland, en Amérique. L'objet essentiel de tous ces travaux était de déterminer les lois de la distribution du Magnétisme dans les aimants, et les variations qu'elle éprouve suivant les actions électriques ou mécaniques auxquelles les aimants peuvent se trouver soumis.

Mes études ont été limitées aux aimants d'acier cylindriques, et leur caractère spécial, c'est d'avoir été réalisées sans autres mesures que celles du moment magnétique. Ces mesures peuvent se faire très exactement par plusieurs méthodes : elles ne sont sujettes à aucune critique. Les résultats qu'on en peut déduire sont, il est vrai, assez restreints par la nature des procédés employés, mais ils gagnent en certitude ce qu'ils perdent en variété ou en étendue.

1° *Nouvelle méthode pour mesurer le moment magnétique d'une aiguille aimantée.* — J'ai d'abord indiqué une méthode très simple pour mesurer les moments magnétiques de très petites aiguilles aimantées. Elle consiste essentiellement à fixer la petite aiguille en croix avec une grande aiguille de moment magnétique connu sur un même support rigide, suspendu par un fil de cocon; on observe la déviation produite par la petite aiguille sur la position d'équilibre de la grande. Par ce procédé, j'ai pu mesurer le moment magnétique d'aiguilles de 2 à 3^{mm} de long et de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, c'est-à-dire de véritables grains de limaille.

2° *Distribution du magnétisme dans les aiguilles saturées.* — J'ai profité de la sensibilité de cette méthode pour étudier les lois de la rupture des aiguilles aimantées. J'ai vérifié en particulier que si l'on brise une aiguille cylindrique trempée dur et aimantée à saturation, tous les fragments de cette aiguille sont des aimants saturés, et j'ai pu me servir de cette observation pour trouver la loi qui lie le moment magnétique d'une aiguille saturée à sa longueur. Si l'on admet que la loi de la distribution du magnétisme dans un aimant cylindrique homogène,

aimanté régulièrement et à saturation est donnée par la formule bien connue de Biot

$$y = A(e^{ax} + e^{-ax}),$$

ou mieux par une formule plus complète donnée par Green et liée par lui à la vieille notion de la force coercitive, on peut calculer le moment magnétique d'aiguilles de diverses longueurs et de divers diamètres, et comparer ainsi la théorie à l'expérience. J'ai reconnu que la formule de Green est rigoureusement applicable aux aiguilles dont la longueur dépasse une vingtaine de fois le diamètre. On doit en conclure que la loi de la distribution du magnétisme dans ces aiguilles est bien représentée par la formule de Biot, à laquelle sont d'ailleurs arrivés tous les expérimentateurs qui ont étudié la distribution du magnétisme par les méthodes directes.

3° *Résultats divers.* — Dans le même Mémoire, j'ai étudié plusieurs autres sujets d'un moindre intérêt théorique, par exemple la rupture d'aiguilles non saturées, la séparation de faisceaux prismatiques opérée parallèlement à l'axe; l'effet de réaimantations successives opérées sur une même aiguille, soit par des frictions sur un aimant, soit par des passages répétés dans une même spirale magnétisante, ou par des actions répétées d'un même courant dans des conditions variées. J'ai représenté les résultats de la plupart de ces expériences par des formules empiriques, qui peuvent trouver leurs explications dans la pratique.

DEUXIÈME MÉMOIRE.

Études sur le Magnétisme

(Deuxième Partie.)

Annales de l'École Normale supérieure, 2e série, t. IV. — Sur la fonction magnétisante de l'acier trempé, *Comptes rendus*, t. LXXX, p. 650. — Sur les quantités de magnétisme et sur la situation des pôles dans les aiguilles minces, *ibid.*, p. 879, et *Journal de Physique*, 1re série, t. IV, p. 367. — Sur l'aimantation temporaire de l'acier, *Comptes rendus*, t. LXXXI, p. 88. — Sur la distribution du magnétisme dans les barreaux cylindriques, *ibid.*, t. LXXXII, p. 1050, et *Journal de Physique*, 1re série, t. VI, p. 346. — Note sur le magnétisme, *Séances de la Société française de Physique*, p. 83; 1875.

Poursuivant le même ordre d'idées qui m'avaient guidé dans mes

premières recherches, j'ai appliqué la mesure des moments magnétiques : 1° à l'étude de la fonction magnétisante de l'acier; 2° à celle des phénomènes de désaimantation et de réaimantation.

1° *Fonction magnétisante de l'acier.* — La quantité de magnétisme que prend, soit d'une manière temporaire ou permanente, un barreau d'acier soumis à l'action d'une force magnétisante constante, varie, avec l'intensité de cette force, d'après une loi complexe. Dans la théorie mathématique du magnétisme, on admet d'ordinaire, avec Poisson, que l'aimantation induite dans le fer doux est proportionnelle à l'intensité de la force magnétisante; mais l'expérience établit que cette relation n'est qu'approchée, et qu'elle cesse d'être pratiquement correcte dès que l'on emploie des forces magnétisantes un peu considérables. Quant à l'acier trempé, la vieille hypothèse de la force coercitive ne rend compte que d'une manière tout à fait grossière des phénomènes compliqués qu'il s'agit d'analyser.

Tandis que MM. Rowland et Stoletow déterminaient les valeurs absolues des fonctions magnétisantes par des méthodes d'une application difficile, je parvenais à en obtenir les valeurs relatives, dans le cas de l'acier trempé, par de simples mesures de moment magnétique.

En combinant convenablement ces mesures, j'arrive à séparer les deux facteurs du moment magnétique, la distance polaire et la quantité de magnétisme. Connaissant cette dernière, soit pendant l'action de la force magnétisante, soit après sa suppression, j'ai tous les éléments nécessaires pour déterminer la variation de la fonction magnétisante soit temporaire, soit permanente de l'acier.

Les résultats que j'ai obtenus confirment parfaitement ceux de MM. Rowland et Stoletow. Il n'y a aucune différence essentielle entre le fer le plus doux et l'acier trempé le plus dur. Dans les deux cas, la presque totalité du magnétisme développé par une force magnétisante suffisamment petite est temporaire. Quand cette force augmente, on voit bientôt apparaître une certaine quantité de magnétisme permanent; l'aimantation, soit temporaire, soit permanente, augmente avec l'intensité de la force magnétisante, d'abord très rapidement, puis d'une manière plus lente; enfin, le magnétisme temporaire et le ma-

gnétisme permanent paraissent tendre l'un et l'autre vers des limites finies quand la force magnétisante croît indéfiniment.

2° *Désaimantations et réaimantations.* — Après avoir aimanté un barreau d'acier, on peut le soumettre à l'action d'une force magnétisante de même sens que celle qui a produit l'aimantation ou de sens contraire, et mesurer le moment magnétique que possède le barreau soit d'une manière temporaire, tandis qu'il est soumis à l'action de cette force, soit d'une manière permanente, après sa suppression. En opérant ainsi, j'ai trouvé que le moment magnétique total, pendant l'action de la force, peut toujours être considéré comme la somme algébrique de deux moments, dont l'un est le moment permanent que l'aimant conservera après la suppression de la force magnétisante, tandis que l'autre représente la partie purement temporaire du moment que communiquerait au barreau, vierge d'aimantations antérieures, la force magnétisante à laquelle il est actuellement soumis. La partie purement temporaire de l'aimantation ne dépend donc que de la force magnétisante actuelle, non des actions auxquelles l'aimant a été précédemment soumis. Il pourra arriver que l'aimantation permanente soit d'un certain sens, disons positive, l'aimantation purement temporaire de sens contraire; comme cas particulier, l'aimantation totale pourra être nulle ou négative : mais il suffira de supprimer la force magnétisante pour voir réapparaître l'aimantation permanente positive.

Puisque les moments temporaire et permanent s'ajoutent algébriquement, la distribution magnétique que porte un barreau soumis à l'action d'une force magnétisante peut être considérée comme la superposition de deux distributions magnétiques : l'une temporaire, l'autre permanente. Il résulte de mes mesures que l'une et l'autre sont conformes aux formules de Green et de Biot; mais les courbes de magnétisme temporaire sont plus *courtes* que celles de magnétisme permanent. Il s'ensuit que, lorsque les quantités des deux distributions sont égales et contraires, le barreau qui les porte n'est pas rigoureusement à l'état neutre : le magnétisme permanent domine, dans la région moyenne, le magnétisme temporaire aux deux extrémités, et le barreau présente deux points conséquents. Cette curieuse propriété a été vérifiée par des expériences directes.

J'ajouterai, en terminant, que mes recherches, qui touchaient par un certain nombre de points à celles que M. Jamin poursuivait vers la même époque avec tant d'éclat, mais par des méthodes absolument différentes, m'ont conduit, sur tous les points communs, à des conclusions identiques aux siennes.

B. — PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES, PHÉNOMÈNE DE PELTIER AUX SURFACES DE CONTACT D'UN LIQUIDE ET D'UN SOLIDE. CONTRACTION DES DÉPOTS GALVANIQUES.

Ces recherches ont fait l'objet de cinq Notes présentées par M. Jamin à l'Académie des Sciences de 1879 à 1881, et de trois Mémoires détaillés publiés dans le *Journal de Physique théorique et appliquée*.

PREMIER MÉMOIRE.

De quelques phénomènes mécaniques et calorifiques qui accompagnent l'électrolyse.

Journal de Physique, 1re série, t. VIII, p. 289-302 et 341-346; 1879. — *Séances de la Société française de Physique*, p. 126, 145. — Pression exercée par les dépôts galvaniques, *Comptes rendus*, t. LXXXVIII, p. 714. — Sur un phénomène analogue au phénomène de Peltier, *ibid.*, t. LXXXIX, p. 146; 1879.

J'ai fait usage, dans ce Mémoire et dans les deux suivants, d'un nouvel instrument, le *thermomètre-électrode*. C'est un thermomètre dont le réservoir, argenté par le procédé Martin, est ensuite recouvert d'un dépôt galvanique régulier de cuivre, de zinc ou de tout autre métal. Cet appareil, employé comme électrode, est sensible à deux sortes d'effets : les actions calorifiques dont les électrodes sont le siège pendant le passage du courant, et les actions mécaniques que le dépôt métallique, en se formant, exerce sur le réservoir du thermomètre.

Ces deux sortes d'actions, superposées dans les conditions ordinaires, peuvent cependant être distinguées sans difficulté : les actions calorifiques cessent avec le courant, les déformations mécaniques subsistent; d'ailleurs, en substituant au thermomètre à mercure un thermomètre à air, la sensibilité de l'appareil aux actions mécaniques n'est pas modifiée, tandis qu'elle s'exagère dans un rapport énorme pour les actions calorifiques.

I. Effets mécaniques. — Je me suis d'abord occupé des effets mécaniques, qui sont considérables. Un dépôt de cuivre suffisamment épais peut déplacer de 10° à 12° le zéro d'un thermomètre à mercure, en exerçant sur le réservoir une pression uniforme qui atteint parfois jusqu'à 100^{atm}.

Le fait même de la contraction des dépôts galvaniques avait été observé par M. Mills [1], par une méthode identique à la mienne, mais ce savant n'avait tiré aucun parti de cette curieuse découverte.

1° *Loi de la contraction des dépôts.* — J'ai démontré que l'on pouvait rendre compte de toutes les particularités du phénomène en admettant que le métal, aussitôt après son dépôt, éprouve un retrait d'une fraction très minime de son volume. Dans le cas d'un thermomètre à réservoir cylindrique, il est aisé d'établir une relation entre l'épaisseur du dépôt métallique, son coefficient de compressibilité k, le coefficient c qui exprime la variation de volume du réservoir correspondant à une pression extérieure de 1^{atm}, la variation α de l'unité de volume, enfin le déplacement du zéro du thermomètre. J'ai vérifié : 1° que, pour un même thermomètre, la loi qui lie le déplacement du zéro à l'épaisseur du dépôt a bien la forme prévue théoriquement; 2° que la valeur numérique du coefficient k de compressibilité du cuivre, déduite de la mesure du coefficient c et du déplacement du zéro, coïncide très approximativement avec la valeur mesurée directement par Regnault. Enfin, en donnant au réservoir thermométrique une forme convenable, celle d'un cylindre elliptique, j'ai pu prévoir que l'effet mécanique du dépôt serait de produire un accroissement de capacité du réservoir, et un déplacement du zéro en sens inverse de celui que produirait le même dépôt sur un réservoir de section circulaire. L'expérience a pleinement confirmé ces prévisions.

2° *Action de la température sur les thermomètres métallisés.* — Quand on fait varier la température d'un thermomètre métallisé, l'inégale dilatation du verre et du métal modifie la pression exercée par le dépôt, et par suite l'écart de l'indication du thermomètre métallisé, comparé

(1) *Proceedings of the Royal Society of London*, t. XXVI, p. 504.

à un thermomètre normal. Quand la température s'élève, cet écart diminue, s'annule et enfin change de signe : alors la pression exercée par le dépôt s'est changée en traction. L'expérience a pu être réalisée jusqu'à des tractions de 10^{atm} à 12^{atm}, sans que l'adhérence du verre et du métal ait été vaincue : au delà de ce terme, il est difficile d'éviter des déchirures du dépôt, et une déformation permanente du réservoir du thermomètre.

3° *Invariabilité des coefficients de compressibilité avec la température et la pression.* — Dans les limites des expériences, c'est-à-dire pour des valeurs de la pression comprises entre $+50^{atm}$ et -10^{atm}, la variation de l'écart du thermomètre est rigoureusement proportionnelle à l'élévation de température. Il en résulte que, dans les mêmes limites, les constantes qui interviennent dans le calcul de la pression exercée par le dépôt, à savoir les coefficients de compressibilité du métal et du verre, n'éprouvent aucune variation appréciable. C'est un résultat qu'il importait de mettre en lumière.

4° *Propriétés particulières du nickel.* — Le nickel électrolytique absorbe, comme on sait, des quantités d'hydrogène assez considérables, qu'il laisse ensuite dégager lentement et en totalité. Il en résulte une variation spéciale du volume et du coefficient de compressibilité du métal, dont on constate aisément l'effet sur un thermomètre nickelé.

La contraction des dépôts galvaniques rend compte de la facilité avec laquelle certains dépôt se déchirent, surtout quand le courant possède une intensité suffisante pour décomposer l'eau : la partie où s'attache une bulle d'hydrogène s'épaissit moins que les parties voisines du dépôt; elle constitue bientôt un point faible, par où la déchirure s'opère dès que la limite d'élasticité se trouve dépassée.

II. Effets calorifiques. — 1° *Phénomène de Peltier.* — Passons maintenant aux actions calorifiques. Elles se présentent avec un caractère de simplicité particulière dans l'électrolyse du sulfate de cuivre entre des électrodes de cuivre. En ce cas on observe, dès que le courant passe, une variation très faible, mais aussi très rapide et très nette, de l'indication du thermomètre. Si le courant n'est pas trop intense, c'est

un échauffement marqué quand le thermomètre est positif, un refroidissement appréciable quand il est négatif : ce dernier effet dépasse parfois $\frac{1}{10}$ de degré; il peut être observé, et il a été découvert, avec des thermomètres de sensibilité médiocre : mais on l'exagère aisément, avec des thermomètres au $\frac{1}{200}$ de degré, de manière à rendre son observation des plus aisées et sa mesure certaine.

L'effet calorifique réversible, ainsi trouvé, est analogue à celui que l'on observe à la surface de soudure de deux métaux et qui a été découvert par Peltier. On sait, d'ailleurs, que le signe de l'effet Peltier est lié à celui de la force électromotrice qui se développe par une variation de température de la soudure, de telle sorte qu'un courant lancé à travers la soudure dans le sens de celui qu'elle est apte à produire par son échauffement la refroidit; qu'un courant de sens contraire l'échauffe. Or divers savants, entre autres M. Ed. Becquerel, avaient annoncé que le cuivre, au contact du sulfate de cuivre, constitue un système thermo-électrique tel que le cuivre chaud est à l'extérieur le pôle positif du couple. C'est précisément le signe qui conviendrait à la force électromotrice thermo-électrique pour qu'elle pût fournir l'interprétation du phénomène calorifique observé. J'étais donc en droit de présumer que c'était bien là le phénomène de Peltier à la surface de contact d'un liquide et d'un solide. C'est ce que j'ai démontré rigoureusement plus tard, comme on le verra par l'analyse de mon second Mémoire.

2° *Autres actions calorifiques.* — Outre le phénomène de Peltier, il est d'autres actions calorifiques dont les électrodes peuvent être le siège. Des réactions secondaires s'y produisent souvent et sont presque toujours accompagnées de dégagements de chaleur considérables; un dégagement de gaz occlus par le métal électrolytique peut, au contraire, être accompagné d'une absorption de chaleur : de là des effets variés dont j'ai observé et décrit divers exemples à la fin de ce premier Mémoire.

DEUXIÈME MÉMOIRE.

Phénomènes thermo-électriques et électrothermiques au contact d'un métal et d'un liquide.

Journal de Physique, 1re série, t. IX, p. 229-241 et 306-320. — *Séances de la Société française de Physique*, p. 96-104; 1880. — Mesure des forces électromotrices thermo-électriques au contact d'un métal et d'un liquide, *Comptes rendus*, t. XC, p. 917. — Mesure absolue du phénomène de Peltier au contact d'un métal et de sa dissolution. *Comptes rendus*, t. XC, p. 987; 1880.

Après avoir *classé*, dans le Mémoire précédent, les divers phénomènes que l'on peut observer à l'aide du *thermomètre-électrode*, il s'agissait maintenant de les soumettre à des mesures précises. Le but spécial du second Mémoire est d'établir, par des mesures absolues, l'existence du phénomène de Peltier à la surface de contact d'un liquide et d'un solide.

A cet effet, j'ai étudié d'abord la grandeur et le signe des forces électromotrices thermo-électriques développées entre un métal et une solution saline, puis la grandeur et le signe du phénomène de Peltier correspondant; enfin j'ai mis en évidence la relation numérique qui existe entre les deux sortes de grandeur.

1° *Mesure des forces électromotrices thermo-électriques.* — Les couples que j'ai employés étaient formés de deux fragments d'un même fil de métal, vernis sauf à leur extrémité, et plongeant dans deux tubes à essai verticaux contenant le liquide, unis par un long tube capillaire et maintenus à des températures différentes. La force électromotrice de ces couples était mesurée, à l'aide de l'électromètre capillaire de M. Lippmann, et par une méthode de compensation qui évite absolument la polarisation des couples.

J'ai trouvé que, pour le cuivre plongé dans un sel du même métal, la force électromotrice thermo-électrique varie proportionnellement à la différence de température des deux cuivres, et qu'elle est très sensiblement indépendante de la dilution ou de l'acidité de la liqueur et aussi de la nature du sel de cuivre employé. La même conclusion s'applique au zinc ou au cadmium plongés dans leurs dissolutions et en

général à tous les métaux qui ne sont pas attaqués par leurs sels. Pour tous ces corps, le métal chaud est, à l'extérieur, le pôle positif du couple.

La force électromotrice caractéristique des sels de zinc diffère peu de celle des sels de cuivre. Ainsi s'explique l'invariabilité presque absolue de la force électromotrice de l'élément Daniell aux deux sulfates, quand on change la température du couple.

Pour les métaux altérables au sein de leurs dissolutions, c'est habituellement le métal froid qui, à l'extérieur, est le pôle positif du couple, contrairement à ce qui arrivait avec les métaux précédents. Mais, dans ce cas, il devient difficile de faire la part du phénomène thermo-électrique et du phénomène purement chimique. Les mesures qui se rapportent à un métal plongé dans la dissolution d'un autre fournissent des forces électromotrices thermo-électriques tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, suivant la nature du métal et du liquide, et n'ont donné lieu à aucune observation d'ordre général.

2° *Mesure du phénomène de Peltier.* — Quand on emploie un thermomètre métallisé comme électrode, la variation de la température que l'on observe tient à deux causes : 1° le dégagement ou l'absorption de chaleur qui constitue l'effet Peltier; 2° le dégagement de chaleur résultant du passage du courant dans les couches liquides en contact immédiat avec le réservoir du thermomètre. Les quantités de chaleur mises en jeu sont respectivement proportionnelles à l'intensité du courant pour l'effet Peltier, au carré de l'intensité du courant pour l'effet Joule; elles sont de même signe l'une et l'autre pour l'électrode positive et de signe contraire pour l'électrode négative. Toutes choses égales d'ailleurs, l'élévation de température du thermomètre électrode, observé pendant deux minutes doit être proportionnelle à la chaleur reçue. En désignant par p et par n les élévations de température aux deux électrodes, par i l'intensité du courant, on doit donc avoir

$$(1) \qquad \left\{ \begin{array}{l} p = +ai + bi^2, \\ n = -ai + bi^2. \end{array} \right.$$

L'expérience établit d'abord qu'on peut représenter fidèlement p et n par les formules (1) avec un même système de valeurs de a et de b

pour les deux formules, ce qui justifie les inductions qui servent de base à notre étude. Elle enseigne de plus que, quand on fait varier la dilution de la liqueur ou la nature du sel dissous, le coefficient b change, ce qui doit être, puisque la résistance spécifique du liquide varie, mais le coefficient a ne change pas. Il s'ensuit que la condition la plus favorable pour obtenir une baisse très notable du thermomètre négatif, c'est d'employer la solution la plus conductrice possible. Dans le cas du cuivre, une solution moyennement concentrée d'azotate de cuivre est celle qui convient le mieux.

Pour transformer les indications thermométriques en indications calorimétriques et obtenir la valeur absolue du phénomène de Peltier, j'ai échauffé le thermomètre à l'aide d'une spirale de fil de maillechort de résistance connue, soigneusement isolée et enroulée directement autour du réservoir. Plaçant alors le thermomètre au sein de la liqueur, dans des conditions aussi voisines que possible de celles des expériences précédentes, j'ai déterminé l'élévation de température produite en deux minutes par des courants d'intensité connue, et j'en ai déduit le coefficient de transformation dont j'avais besoin.

3° *Relation du phénomène de Peltier et de la force électromotrice thermo-électrique correspondante.* — En appliquant les principes de la Théorie mécanique de la chaleur aux phénomènes thermo-électriques, Sir W. Thomson a établi la formule

$$\Pi = \frac{T}{J}\,\frac{dE}{dt}, \qquad (2)$$

dans laquelle Π représente la valeur absolue de l'effet Peltier [c'est le coefficient a de notre formule (1) exprimé en valeur calorimétrique], E la force électromotrice thermo-électrique du couple correspondant, T la température absolue et J l'équivalent mécanique de la chaleur. Remplaçant dans la formule (2) $\frac{dE}{dt}$ par sa valeur déduite des mesures de force électromotrice, j'ai calculé Π : les valeurs trouvées pour les sels de cuivre, de zinc et de cadmium ont présenté l'accord le plus satisfaisant avec les valeurs directement observées. Ainsi le but que je poursuivais est atteint de la manière la plus complète.

Le Mémoire se termine par la comparaison de la grandeur de l'effet

Peltier et des chaleurs d'oxydation et de dissolution dans les acides du cuivre, du zinc et du cadmium. On ne reconnaît aucune relation entre les deux espèces de grandeurs.

TROISIÈME MÉMOIRE.

Sur la contraction des dépôts galvaniques et sa relation avec le phénomène de Peltier.

Journal de Physique, 1re série, t. X, p. 241-252, et *Séances de la Société française de Physique*, p. 82-93; 1881. — Sur le changement de volume qui accompagne le dépôt galvanique d'un métal, *Comptes rendus*, t. XCII, p. 868; 1881.

Les phénomènes calorifiques dont les électrodes sont le siège ont maintenant reçu leur explication complète, mais la contraction des dépôts galvaniques est encore un phénomène isolé. Il convient de l'étudier de plus près et de déterminer, ce que l'on n'avait point fait encore, comment varie la contraction de l'unité de volume du métal, quand on fait varier l'intensité ou plutôt la *densité* du courant qui produit le dépôt. J'appelle *densité du courant* son intensité rapportée à l'unité de surface qu'il traverse.

Le premier résultat de cette étude a été de montrer que la contraction galvanique du cuivre diminue avec la densité du courant, qu'elle s'annule et enfin se change en dilatation pour une densité de courant suffisamment faible. Ce changement de signe, difficile à observer dans le cas du sulfate de cuivre, est au contraire très net avec l'azotate de cuivre, plus remarquable encore avec le chlorure de cadmium ou le sulfate de zinc; enfin dans le cas du chlorure de zinc, et dans les limites de densité du courant qui fournissent un dépôt solide et adhérent, on n'observe que la dilatation du dépôt; mais cette dilatation passe visiblement par un maximum, et il est évident, d'après la marche du phénomène, qu'elle se réduirait à zéro et changerait de signe pour des densités de courant suffisamment grandes, si l'on n'atteignait auparavant la limite où l'eau se décompose et où le dépôt cesse d'être adhérent.

Bien que les mesures ne permettent pas de calculer avec quelque précision les constantes d'une formule empirique fournissant la repré-

sentation complète du phénomène, on voit que la contraction α doit être liée à la densité du courant et, par conséquent, à son intensité par une formule parabolique, telle que

$$\alpha = - mi + qi^2,$$

analogue à celle qui donne les variations de température p de l'électrode négative.

Si l'on remarque, de plus, que la dilatation galvanique s'observe mieux avec l'azotate de cuivre qu'avec le sulfate, avec le zinc qu'avec le cuivre, et qu'il en est de même du refroidissement dû au phénomène de Peltier, on sera naturellement amené à considérer les deux sortes d'actions comme connexes et à rapprocher l'échauffement de l'électrode négative de sa contraction, son refroidissement de sa dilatation.

On sait que le dissolvant ne joue guère, dans l'électrolyse d'un sel, qu'un rôle inerte. C'est le sel métallique dont les éléments transportent le courant, et il est naturel de penser que les variations de température, affectant la masse de l'électrode et du liquide qui la baigne, tiennent aux dégagements ou aux absorptions de chaleur dont les molécules salines *seules* sont le siège. On peut donc, avec quelque vraisemblance, supposer que le métal, à l'instant où il se dépose, ne possède pas exactement la température de la masse du liquide et de l'électrode. S'il est plus chaud, il se refroidira après son dépôt et comprimera la couche sous-jacente; s'il est plus froid, il se dilatera et exercera sur elle une traction.

L'un ou l'autre phénomène peut se produire, d'après les lois du phénomène de Peltier, suivant l'intensité du courant qui transporte le métal sur l'électrode négative; la compression correspondra donc aux grandes intensités du courant et la dilatation aux petites, comme l'expérience vient justement de nous le montrer.

Ainsi se trouve réalisée, au moins en principe, la synthèse des phénomènes d'ordre calorifique et mécanique, que l'expérience primitive nous présentait en bloc, et que nous avons dû séparer d'abord et analyser patiemment pour en trouver les lois et les relations intimes.

C. — POLARISATION DES ÉLECTRODES ET CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES LIQUIDES.

J'ai publié, sur ce sujet, sept Notes, dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. Les deux premières ont pour objet principal d'établir qu'un même liquide n'a qu'une seule manière de conduire l'électricité; elles ont été réunies et développées dans un Mémoire du *Journal de Physique* (1882).

Les cinq dernières Notes se rapportent à une loi analogue à la loi de Faraday, qui régit la conductibilité électrique des dissolutions salines très étendues. J'ai publié, sur le même sujet, un Mémoire d'ensemble dont un extrait a paru dans le *Journal de Physique* (1884); le Mémoire complet paraîtra dans les *Annales de Chimie et de Physique* (décembre 1884).

PREMIER MÉMOIRE.

Sur la polarisation des électrodes et sur la conductibilité des liquides.

Journal de Physique, 2e série, t. I, p. 346-364, et *Séances de la Société française de Physique*, p. 52-60. — *Comptes rendus*, t. XCIV, p. 1243 et 1302.

De nombreuses discussions s'étaient élevées entre les physiciens, au sujet de la conductibilité des liquides. Quand on introduit dans le circuit d'un voltamètre une force électromotrice insuffisante pour produire la décomposition de l'eau, on constate, à l'aide de galvanomètres très sensibles, l'existence d'un courant extrêmement faible. Ce courant a dû traverser l'électrolyte, et, puisqu'on ne constate pas de traces de décomposition, on peut se demander comment l'électricité a été transmise par le liquide. Dans les conditions ordinaires, la conductibilité est *électrolytique*, c'est-à-dire que les éléments dissociés du sel, les *ions* de Faraday, ont convoyé l'électricité d'un pôle à l'autre. Plusieurs physiciens avaient cru que les liquides possédaient aussi une seconde conductibilité, très faible par rapport à la précédente, mais de nature analogue à celle des métaux. Cette conductibilité *métallique* rendait compte du transport d'électricité non accompagné de décomposition de l'électrolyte.

Pour savoir ce qu'il en est, il convenait de mesurer la résistance d'une même colonne liquide pendant l'électrolyse, et dans les conditions où l'électrolyse ne peut se produire. J'ai employé, à cet effet, une variante d'une méthode générale, indiquée par M. Lippmann, et qui rend les mesures de conductibilité des liquides absolument indépendantes du phénomène de la polarisation des électrodes.

1° *Polarisation.* — Dans une première série d'expériences, j'ai placé dans le circuit d'un voltamètre à eau acidulée 1 élément Daniell ($1^{volt},09$) ou 1 élément zinc-cadmium ($0^{volt},365$), insuffisants pour décomposer l'eau, et une résistance métallique de 200 000 ohms. J'ai déterminé, par la méthode de M. Lippmann, la polarisation individuelle de chacune des électrodes et l'intensité du courant, à diverses époques après la fermeture du circuit : j'ai ainsi constaté que le courant traverse, au premier instant, le liquide avec la pleine intensité qui conviendrait à la force électromotrice et à la résistance employées, qu'il diminue progressivement à mesure que la polarisation se produit, et tend vers une limite finie qui, dans une de mes expériences, était pratiquement atteinte au bout de deux jours : le courant possédait alors une intensité égale aux 0,17 de celle qu'il aurait eue s'il n'y avait pas de polarisation : un tel courant n'emploierait pas moins de trois ans et demi, pour transporter la quantité d'électricité nécessaire à mettre en liberté 1^{gr} d'hydrogène.

2° *Conductibilité.* — J'ai ensuite modifié la disposition de l'expérience, de manière à donner, à la mesure de la conductibilité du liquide, toute la précision désirable. J'ai placé les deux électrodes de platine conduisant le courant dans deux vases séparés et soigneusement isolés, que j'ai fait communiquer par un siphon capillaire de 1^{m} de longueur environ, et j'ai mesuré la différence de potentiel aux deux extrémités du *fil liquide* contenu dans le siphon, à l'aide de deux électrodes parasites, en relation avec les deux mercures de l'électromètre de M. Lippmann.

L'électromètre était ramené au zéro par une force électromotrice compensatrice, de manière à éviter toute trace de polarisation des électrodes parasites.

Pour déterminer, dans ces conditions, la résistance du fil liquide, il suffit de comparer la différence de potentiel aux deux extrêmités du siphon à la différence de potentiel aux deux bouts d'une résistance métallique connue.

En opérant ainsi et en intercalant, dans le circuit, une force électromotrice et une résistance métallique arbitraires, j'ai mesuré la résistance du fil liquide, avec ou sans électrolyse apparente; dans le second cas, quand la force électromotrice est, par exemple, de $0^{volt},365$, la résistance mesurée serait la résistance *métallique* de l'électrolyte : elle devrait être très inférieure à sa résistance *électrolytique* mesurée dans le premier cas, par exemple avec une force électromotrice de 10^{volts}.

Mais j'ai trouvé les deux résistances parfaitement égales. *L'eau acidulée n'a donc qu'une seule manière de conduire le courant électrique, quels que soient les phénomènes dont les électrodes sont le siège.* Les mots de conductibilité *métallique* et *électrolytique*, en tant qu'appliqués à un même liquide, doivent disparaître de la Science.

3° *Cas des mélanges.* — Une seconde Partie du Mémoire étend ces conclusions aux mélanges de deux sels métalliques dissous : soit, par exemple, une dissolution de 1 partie, en poids, de sulfate de cuivre et de 9 parties de sulfate de zinc, que l'on électrolyse entre des électrodes de cuivre. On sait qu'un courant peu intense, traversant le mélange, ne dépose que du cuivre; mais, si l'on augmente progressivement l'intensité du courant, au dépôt brillant de cuivre succède un dépôt rougeâtre et sans adhérence, puis un dépôt noir boueux, enfin un dépôt d'un noir brillant, riche en zinc et un peu adhérent. J'ai mesuré dans ces divers cas la polarisation individuelle des deux électrodes et la conductibilité du liquide. L'électrode positive ne se polarise que faiblement, et il en est de même de l'électrode négative, tant que le dépôt de cuivre reste brillant; mais, dès que le dépôt rouge apparaît, la polarisation devient énergique : elle est plus forte encore avec le dépôt noir brillant. Quant à la conductibilité du liquide, *elle demeure absolument invariable*, malgré la variété des réactions électrolytiques, autour de l'électrode négative. Que le cuivre se dépose seul ou allié à une proportion quelconque de zinc, les deux sels dissous prennent part l'un et l'autre au

transport de l'électricité, et la conductibilité qui en résulte ne dépend exclusivement que de la composition de la liqueur.

Le Mémoire se termine par une observation générale sur l'électrolyse des mélanges de sels de plusieurs métaux. Le métal qui se dépose le premier, pour les plus faibles intensités de courant, est celui dont la précipitation absorbe la plus faible quantité de chaleur.

DEUXIÈME MÉMOIRE.

Sur la conductibilité électrique des dissolutions salines très étendues.

Annales de Chimie et de Physique, 6e série, t. III, p. 433-501. — *Journal de Physique*, 2e série, t. III, p. 325-355. — *Séances de la Société française de Physique*, p. 52-60; 1884. — *Comptes rendus*, t. XCVII, p. 140 et 362. — Sur le phénomène du transport des *ions* et sa relation avec la conductibilité des dissolutions salines, *ibid.*, p. 797. — Application de la loi de Faraday à la recherche de la conductibilité des dissolutions salines, *ibid.*, p. 918. — Sur la conductibilité des dissolutions aqueuses très étendues, *ibid.*, t. XCIX, p. 30; 1884.

La conductibilité électrique des sels dissous dans l'eau varie, avec la concentration, d'une manière extrêmement complexe et différente d'un sel à un autre. On ne possède à cet égard ni loi générale, ni formule empirique d'une application quelque peu étendue. On conçoit *a priori* que cette conductibilité dépend à la fois de la nature chimique du sel, des hydrates qu'il est susceptible de former et de leur stabilité; l'expérience établit aussi qu'elle n'est pas sans relations avec quelques-unes des propriétés physiques de la dissolution, en particulier avec son degré de viscosité. Mais la part de ces diverses circonstances n'avait pu être faite jusqu'ici.

1° *Loi générale*. — Il m'a paru qu'il y avait lieu de simplifier d'abord le problème en ne considérant que des dissolutions de propriétés physiques identiques. J'ai donc pris des dissolutions tellement étendues que leur densité et leur viscosité se confondent avec celle de l'eau pure; leur conductibilité est encore relativement énorme et se mesure aisément par une méthode analogue à celle qui a été employée dans le Mémoire précédent. Elle consiste essentiellement à comparer, à l'aide

de l'électromètre de M. Lippmann, les différences de potentiel aux extrémités de deux siphons capillaires, placés dans un circuit unique et contenant chacun l'un des liquides dont on veut comparer les résistances.

En opérant ainsi, j'ai montré d'abord que, quand on prend une dissolution saline déjà étendue et qu'on double la quantité d'eau qu'elle contient, la résistance spécifique de la dissolution se multiplie par un coefficient λ, en général plus petit que 2, mais qui croît avec la dilution, et tend assez rapidement vers la limite 2. A partir d'une dilution suffisante, la conductibilité spécifique c peut donc être considérée comme proportionnelle au poids de sel dissous. J'ai trouvé que, pour les sels anhydres, on a, en désignant par l l'équivalent du sel,

$$c = k\frac{p}{e}.$$

Le coefficient k est le même pour tous les sels neutres. En d'autres termes, *la conductibilité moléculaire de tous ces sels est la même.*

Cette loi, dont l'énoncé se rapproche de la loi de Faraday, a été établie sur de très nombreux exemples de sels anhydres appartenant à toutes les catégories. Elle a été étendue aux sels hydratés et en particulier aux sulfates, mais seulement comme une loi limite qui s'approche de plus en plus d'être vérifiée quand on emploie des dilutions extrêmes. Tel a été l'objet de la première Note que j'ai présentée à ce sujet à l'Académie en janvier 1884.

2° *Effet de la température.* — Il était assez naturel de penser que, si la loi des conductibilités est exacte à une certaine température, elle ne peut être fausse à une autre; par conséquent la variation de la conductibilité de tous les sels neutres en dissolution, par l'effet de la température, doit être la même. Cette variation est, on le sait, fort considérable et, par suite, sa mesure fournit un moyen de contrôle délicat pour éprouver l'exactitude de la loi.

L'expérience a établi que, pour tous les sels neutres, la conductibilité croît proportionnellement à l'élévation de température, de la $\frac{1}{30}$ partie de sa valeur environ par degré centigrade. C'est précisément la quan-

tité dont varie le coefficient de frottement de l'eau pure, d'après les expériences de Poiseuille.

Puisque, d'après la loi que j'ai énoncée, ce sont bien les éléments du sel et non l'eau qui servent de véhicule à l'électricité, ces éléments sont entraînés d'un pôle à l'autre, au sein de la masse inerte du dissolvant, ce qui ne peut avoir lieu sans frottement. Mais, à la limite de dilution où l'on se trouve, on peut admettre qu'une molécule saline ne rencontre, dans son déplacement, que des molécules d'eau : il est donc tout naturel que le coefficient de frottement de l'eau s'introduise dans ces recherches, et que la conductibilité de la dissolution varie comme le coefficient de frottement (février 1884).

3° *Relation entre la conductibilité des dissolutions salines et le phénomène du transport des ions.* — Jusqu'ici la loi des équivalents a été présentée comme générale, mais elle comporte quelques exceptions qu'il convient de signaler et d'interpréter. Elles se rattachent au phénomène connu sous le nom de *transport des ions*.

Considérons un voltamètre à lames de platine dont les électrodes sont très écartées, et dont la construction est telle qu'on peut, après l'électrolyse, séparer les liquides qui baignent le pôle positif et le pôle négatif, pour en faire l'analyse. Quand le voltamètre contient, par exemple, une solution de sulfate de potasse, on trouve que la liqueur s'est également appauvrie aux deux pôles, de telle sorte que, si le voltamètre a été divisé en deux moitié égales et si $1^{éq}$ de sel a été décomposé, il manque $0^{éq},5$ de sulfate de potasse de part et d'autre; à la place, on trouve $1^{éq}$ d'acide sulfurique autour du pôle positif et $1^{éq}$ de potasse autour du pôle négatif : $1^{éq}$ d'oxygène et $1^{éq}$ d'hydrogène se sont dégagés aux deux pôles. Je désigne une telle électrolyse sous le nom d'*électrolyse normale*. Elle se produit avec la plupart des sels neutres anhydres, surtout dans les dissolutions très étendues.

Supposons maintenant que le voltamètre contienne une solution de nitrate de soude : on trouve que la liqueur s'appauvrit surtout autour du pôle négatif. Quand $1^{éq}$ de sel a été décomposé, la perte de concentration au pôle négatif correspond à $0^{éq},614$, et au pôle positif à $0^{éq},386$ seulement. Une telle électrolyse est, pour moi, une *électrolyse anomale*. Elle se produit avec quelques sels anhydres, mais surtout pour les sels

hydratés. Avec ces derniers, l'anomalie diminue d'ordinaire quand la dilution augmente et, dans beaucoup de cas, paraît tendre à s'annuler pour les dilutions extrêmes.

En rapprochant ces faits de la manière dont les divers sels se comportent sous le rapport de leur conductibilité, on reconnaît que la loi que j'ai énoncée est caractéristique des électrolyses normales et s'écarte d'autant plus d'être exacte que l'anomalie de l'électrolyse est plus accusée. Pour les sels qui demeurent anormaux, même aux dilutions extrêmes, la loi des équivalents n'est pas applicable. Je signale, dans mon Mémoire, les exceptions que j'ai observées : elles rentrent toutes dans cette catégorie (mars 1884).

4° *Application de la loi de Faraday*. — Dans ce qui précède, il ne s'agit que des sels neutres proprement dits. Les sels à plusieurs équivalents d'acide, les sels doubles rentrent aussi dans la loi que j'ai énoncée, mais à une condition : c'est que l'on prenne pour équivalent de ces sels celui qui convient à l'application de la loi de Faraday. Ainsi le bichlorure de platine, le sesquichlorure d'or, le sulfate de peroxyde de fer, sous leurs symboles $PtCl^2$; Au^2Cl^3; $Fe^2O^3, 3SO^3$ représentent : le premier, $2^{éq}$, les deux derniers, $3^{éq}$ d'un sel neutre; c'est-à-dire que les quantités de ces sels, électrolysées dans un circuit contenant un voltamètre à chlorure de potassium KCl, seront respectivement $\frac{1}{2}PtCl^2$, $\frac{1}{3}Au^2Cl^3$, $\frac{1}{3}(Fe^2O^3, 3SO^3)$ quand la quantité de chlorure de potassium KCl aura été décomposée. Ce sont précisément les poids de sel qui communiqueront à l'eau distillée la même conductibilité que KCl.

La relation de la loi des conductibilités et de la loi des équivalents électrochimiques tire de ces comparaisons nouvelles et de toutes celles qui font l'objet de ma quatrième Note (avril 1884) une confirmation très importante : elle peut désormais être considérée comme absolument certaine.

5° *Substances organiques, acides et bases*. — Outre les sels neutres, l'eau dissout un grand nombre de substances, en particulier des acides, des bases et des substances organiques de fonctions chimiques variées.

Les substances organiques, autres que les sels, sont en général iso-

lantes à l'état de pureté, et leurs dissolutions isolent à peu près aussi bien que l'eau elle-même. Leur conductibilité électrique est d'un autre ordre de grandeur que celles que nous considérons dans ce Mémoire, et les méthodes quc j'ai appliquées ne se prêtent pas à leur étude.

Restent les acides et les bases dont les dissolutions possèdent souvent une conductibilité très grande. J'ai démontré que les acides et les bases qui ne se combinent pas avec l'eau en s'y dissolvant (acides carbonique et sulfureux, ammoniaque, aniline, etc.) ne possèdent qu'une conductibilité excessivement faible. Au contraire, les acides sulfurique, chlorhydrique, azotique, la potasse, la soude, etc., conduisent mieux que des sels neutres de même équivalent. Mais cette conductibilité varie, avec la température et la dilution, d'après des lois complexes qui ne permettent pas de faire rentrer directement ces corps dans la loi des équivalents.

On sait, en effet, qu'un même acide ou une même base forment avec l'eau plusieurs combinaisons définies que l'on a pu souvent obtenir cristallisées. Ces combinaisons sont, en général, assez instables pour se dissocier plus ou moins complètement, soit par l'addition d'une nouvelle quantité d'eau, soit par une élévation de température. La conductibilité doit éprouver des variations correspondantes, ce qui est conforme à l'observation. Dans des cas particuliers, la mesure de la conductibilité peut même servir à indiquer quel est l'hydrate particulier qui existe dans la dissolution (juillet 1884).

6° *Critique des méthodes antérieures; applications.* — Dans le Mémoire détaillé publié dans les *Annales de Chimie et de Physique* se trouvent discutées les mesures faites antérieurement sur la conductibilité des dissolutions salines. J'établis que les physiciens qui ont étudié la question avant moi employaient des dissolutions trop concentrées, pour que la loi limite de la conductibilité pût se dégager de leurs expériences; je prouve aussi que les résultats qu'ils ont obtenus ne peuvent être considérés comme rigoureusement corrects, surtout pour les dissolutions étendues de certains sels, tels que les sels d'alumine ou de magnésie, dans lesquels les électrodes métalliques se polarisent avec une grande énergie.

Je signale d'autre part les applications pratiques que peut recevoir

la mesure des conductibilités, pour reconnaître le degré de pureté d'une eau distillée ou d'un liquide organique altérable. Les moindres traces d'acides ou de sels dissous ou développés dans une liqueur par suite d'altérations spontanées seront sensibles à l'électromètre, dans des conditions où les réactifs ordinaires de la Chimie n'indiqueraient absolument rien.

NOTES ET MÉMOIRES DIVERS.

Sur une expérience de Mariotte.

Journal de Physique, 1re série, t. II, p. 263; 1873.

Cette Note a pour objet l'explication d'une expérience de capillarité indiquée par Mariotte dans son *Traité du mouvement des eaux*. Dans un verre contenant de l'eau, les corps mouillés (bulles, balles de verre creuses, etc.) se collent contre le bord; les corps non mouillés (boules de cire d'Espagne, etc.) se placent au milieu. C'est l'inverse qui se produit dans un vase de verre trop plein, au-dessus duquel l'eau forme une surface convexe.

Sur les distributions fictives d'électricité et de magnétisme, que l'on peut substituer à un système électrique ou magnétique donné.

Journal de Physique, 1re série, t. II, p. 297-303; 1873.

Cette Note contient une démonstration simple de quelques théorèmes d'ailleurs connus et leur application à la recherche de la distribution de pôles magnétiques qu'il faudrait imaginer à la surface du globe pour équivaloir à un petit aimant de moment magnétique connu ayant son centre au centre de la Terre.

Sur la conservation de l'énergie dans les courants électriques.

Journal de Physique, 1re série, t. IV, p. 45-52; 1875.

On applique le principe de la conservation de l'énergie aux courants de diverses origines, et l'on établit, par exemple, que si un courant est

entretenu par la dépense d'un travail mécanique τ par seconde dans une résistance totale R, l'intensité I du courant est donnée par la formule

$$I = \sqrt{\frac{\tau}{R}}.$$

On suppose encore qu'un courant résulte de la dépense d'une quantité finie d'énergie et qu'on connaît à chaque instant l'énergie T qui demeure disponible. On en déduit la loi suivant laquelle varie l'intensité du courant. Par exemple, si la vitesse de déperdition de l'énergie est à chaque instant proportionnelle à l'énergie disponible,

$$-\frac{dT}{dt} = aT;$$

on en déduit

$$I = \sqrt{\frac{T_0}{R}}\, e^{-\frac{a}{2}t}.$$

Cette loi exponentielle convient à l'intensité de l'extra-courant direct ou du courant induit direct (Helmholtz, Du Bois-Reymond), etc.

Sur les courants d'origine mécanique.

Journal de Physique, 1re série, t. IV, p. 135-138; 1875.

M. le professeur Rossetti [1] ayant mesuré l'intensité des courants produits par une machine de Holtz, dont la rotation était entretenue par la chute d'un poids, était arrivé à des conclusions dont quelques-unes paraissaient en contradiction avec l'une des formules contenues dans la Note précédente. J'établis que ce désaccord apparent de la théorie et de l'expérience tient principalement à la déperdition d'électricité sur les plateaux entre le point où ils se chargent et le point où ils réagissent sur les conducteurs pour produire le courant mesuré.

J'établis en outre que, des nombres publiés par M. Rossetti, résulte la loi expérimentale suivante, non énoncée par l'Auteur : *Quand le*

[1] *Nuovo Cimento*, 2e série, t. XII, et *Journal de Physique*, 1re série, t. IV, p. 65.

disque tournant est soumis à l'action d'un même poids moteur et que l'on intercale diverses résistances interpolaires, la vitesse de rotation varie de telle sorte que le travail efficace dépensé par seconde est très sensiblement constant. Le mode de production de l'énergie qui entretient le courant dans la machine de Holtz diffère donc absolument de celui qui caractérise les piles : dans celles-ci l'énergie produite par unité d'électricité transportée est constante, quelle que soit la résistance interpolaire; dans celle-là l'énergie dépensée par unité de temps est fixe.

Continuité de l'état liquide et de l'état gazeux de la matière.

Journal de Physique, 1re série, t. VI, p. 368-375; 1877.

Au moment où cette Note a été rédigée, on considérait encore six gaz comme permanents. Sa publication a sensiblement coïncidé avec celle des premiers résultats obtenus par MM. Cailletet et Pictet dans leurs recherches sur la liquéfaction de ces gaz (décembre 1877). J'établissais, en m'appuyant sur les résultats des recherches antérieures, que le passage des propriétés physiques des liquides ordinaires (eau, mercure) à celle des gaz permanents à 0° et sous la pression atmosphérique se fait par gradations insensibles, si l'on considère : 1° la *densité,* car l'air avait été amené par M. Cailletet à une densité de 0,672, voisine de celle de l'acide cyanhydrique liquide, par une pression de 705^{atm}; 2° la *dilatation,* car les liquides surchauffés se dilatent plus que les gaz communs. Je montrais encore, en m'appuyant sur la formule connue

$$\lambda = \text{AT}(v_1 - v)\frac{dp}{dt},$$

que la chaleur latente de vaporisation doit être nulle au point critique. J'émettais enfin l'opinion que, pour une température donnée peu supérieure au point critique et des pressions variables, la chaleur spécifique d'un gaz doit être la plus considérable possible dans la région de compression rapide que manifestent, par exemple, les courbes publiées par M. Andrews, relativement à l'acide carbonique.

Des diagrammes électriques.

Journal de Physique, 1re série, t. VII, p. 264, 273; 1878.

Dans cette Note se trouvent exposées, pour la première fois en France, les propriétés des diagrammes électriques de Maxwell; une règle pratique, énoncée sans démonstration par l'auteur et relative à la construction des lignes de force, est établie comme une conséquence du théorème de Green.

Nombre des éléments nécessaires pour déterminer l'effet extérieur d'un systéme optique.

Journal de Physique, 1re série, t. VII, p. 331-340; 1878.

J'indique la construction géométrique des images fournies par des systèmes optiques définis de diverses manières et je fixe le nombre et la nature des conditions indépendantes qui doivent être données pour que l'effet extérieur du système optique soit déterminé sans ambiguïté.

Sur la compressibilité de l'air et de l'acide carbonique à 100°, d'après les expériences de Regnault.

Journal de Physique, 1re série, t. IX, p. 12-18; 1880.

La connaissance de la loi de compressibilité d'un gaz à 0° et de son coefficient de dilatation sous pression constante de 0° à 100° pour les diverses valeurs de la pression permet de reconnaître si le gaz obéit ou non à la loi de Mariotte à 100° et de combien il s'en écarte. J'établis qu'il résulte des nombres publiés par Regnault : 1° que la loi de Mariotte s'applique à l'air à 100° pour des pressions comprises entre $\frac{1}{8}$ d'atmosphère et 5 atmosphères; 2° qu'elle ne s'applique pas à l'acide carbonique à 100°, contrairement aux conclusions auxquelles Regnault était arrivé par des mesures de la densité de l'acide carbonique à cette température. Ce dernier résultat est d'accord avec les conclusions que M. Amagat tire de ses propres expériences.

Analogie thermodynamique des phénomènes thermo-électriques et du phénomène de Peltier.

Journal de Physique, 2e série, t. I, p. 267-268; 1882.

Si l'on considère un canal fermé sur lui-même et contenant à sa partie inférieure du sable saturé d'eau, à sa partie supérieure de l'air saturé de vapeur d'eau, on peut assimiler le sable et l'air à deux conducteurs, et l'eau liquide ou gazeuse au fluide électrique imaginaire dont le déplacement dans les conducteurs engendre le courant. Cela posé, si tous les points de circuit se trouvent à la même température, il ne pourra se produire de courant; mais, si l'on chauffe l'une des surfaces de séparation du sable et de l'air, une circulation d'eau à l'état de liquide et de vapeur se produit aussitôt dans le canal. Si l'on détermine artificiellement cette circulation à l'aide d'une pompe rotative placée dans l'air du tube, une différence de température s'établit aussitôt entre les deux surfaces, celle qui est le siège d'une évaporation et celle où se produit la condensation. La chaleur développée par le frottement du fluide contre les parois du canal ou le sable, représente celle qui est dégagée dans un circuit électrique en vertu de la résistance des conducteurs.

OUVRAGES ET PUBLICATIONS

D'ENSEIGNEMENT ET DE CRITIQUE.

Théorie des phénomènes électriques,

par M. E. Bouty, professeur au lycée Saint-Louis. 1 vol. in-8 de 84 pages et 1 planche. Paris, 1878.

Cette brochure, destinée à servir de supplément au Tome Ier du *Cours de Physique de l'École Polytechnique* de M. Jamin, comprend quatre Chapitres.

Dans le premier se trouvent exposées succinctement les propriétés du potentiel électrique, les conséquences du théorème de Green et la construction des diagrammes électriques de Maxwell.

Le Chapitre II est relatif aux capacités électriques et à l'influence. On y traite d'une manière élémentaire des capacités électriques, des coefficients d'induction de Maxwell, des images électriques, des condensateurs sphériques et des condensateurs fermés quelconques.

Les électromètres, et en particulier l'électromètre absolu de Sir W. Thomson et son électromètre à quadrants, font l'objet du Chapitre III.

Le Chapitre IV se rapporte à l'énergie électrique et en particulier à l'énergie calorifique des décharges.

Notes sur les progrès récents de la Physique,

Appendice au Petit Traité de Physique de M. Jamin, par M. E. Bouty, professeur au lycée Saint-Louis. Petit in-8 de 76 pages. Paris, 1882.

Sommaire :

Note I. — Tension superficielle des liquides. Expériences de Plateau. Systèmes laminaires. Extension des corps gras à la surface de l'eau. Applications diverses.

Note II. — Compressibilité et liquéfaction des gaz.

Note III. — Machine pneumatique à mercure. Jauge de Mac-Leod.

Note IV. — Sur les mesures électrostatiques.

Note V. — Sur la mesure des forces électromotrices et des résistances.

Note VI. — Nouvelles applications de l'Électricité : aimants laminaires de M. Jamin; machines Gramme; bougies et lampes électriques; transport de la force à distance; progrès de la Télégraphie; câbles sous-marins, siphon enregistreur; téléphones et microphones.

Note VII. — Machine parlante; phonographe.

Note VIII. — Actions diverses des radiations lumineuses et calorifiques : radiomètre; thermophone, photophone; propriétés photographiques de la rétine; théorie des couleurs physiologiques.

Toutes les questions traitées dans cette brochure sont exposées d'une manière élémentaire; la lecture en est accessible aux candidats au Baccalauréat ès Sciences.

Cours de Physique de l'École Polytechnique;

par M. Jamin. 3e édition, augmentée et entièrement refondue, par MM. Jamin et Bouty. 11 fascicules in-8, formant 4 volumes. Paris, 1877-1883.

La deuxième édition du *Cours de Physique de l'École Polytechnique*, publiée par M. Jamin, en 1868-69, formait 3 Volumes, contenant ensemble à peu près 2000 pages. M. Jamin a bien voulu me confier le soin d'en publier une troisième édition, en me laissant toute liberté pour les modifications ou additions nécessitées par les progrès incessants de la Science.

La nouvelle édition comprend 4 Volumes, divisés eux-mêmes en 11 fascicules, ayant ensemble à peu près 3500 pages, et dont chacun forme un petit Traité complet. Des indications bibliographiques nombreuses renvoient le lecteur aux Mémoires originaux, qu'il peut avoir intérêt à consulter. Enfin, deux Tables alphabétiques, l'une par noms d'auteurs, l'autre par ordre de matières, permettent de se procurer sans peine tous les renseignements qui peuvent être fournis par l'Ouvrage.

Nous allons passer rapidement en revue les divers fascicules, pour avoir l'occasion d'indiquer les principales questions nouvelles qui s'y trouvent traitées.

Tome I.

Premier fascicule : *Instruments de mesure ; hydrostatique.* — Les principales additions consistent en quelques compléments sur les notions de Mécanique, placées en tête de l'Ouvrage, les systèmes d'unités, la compressibilité des gaz, etc.

Deuxième fascicule : *Physique moléculaire.* — La plus grande partie de ce fascicule est nouvelle. L'étude de la capillarité a reçu des développements considérables, en particulier, par l'introduction de la notion de tension superficielle. Un chapitre entièrement neuf se rapporte à la diffusion des liquides et des gaz; un autre, à l'écoulement des fluides et à leur frottement intérieur. Enfin l'étude de l'élasticité des solides a été complétée par des notions assez étendues, sur l'équilibre d'un parallélépipède élastique, d'un tétraèdre, d'une sphère ou d'un cylindre creux, et par quelques nouveaux développements sur les limites de l'élasticité.

Troisième fascicule : *Gravitation universelle ; électricité statique.* — Les principales additions que comprend ce fascicule se retrouvent dans la *Théorie des phénomènes électriques*, dont j'ai déjà parlé ci-dessus. Je signalerai, en outre, les expériences de MM. Cornu et Baille sur l'attraction universelle; de plus larges développements sur les coefficients d'induction, l'énergie électrique, les électromètres, les nouvelles machines électriques, l'électricité atmosphérique; enfin, un Chapitre, en grande partie nouveau, sur la décharge disruptive.

Tome II.

Premier fascicule : *Thermométrie ; dilatations.* — Les principales additions se rapportent à la définition des températures, à la dilatation des cristaux, aux mesures de la densité des vapeurs saturées, de la dilatation et de la compressibilité des vapeurs.

Deuxième fascicule : *Calorimétrie ; théorie mécanique de la chaleur ; propagation de la chaleur.* — Le Chapitre relatif aux méthodes calorimétriques a été augmenté par la description du calorimètre de M. Berthelot, du calorimètre de Bunsen et par l'exposition des méthodes de compa-

raison; celui des chaleurs spécifiques des gaz par les expériences de MM. Jamin et Richard.

La théorie mécanique de la chaleur a reçu de larges développements, en particulier en ce qui concerne le principe de Carnot, la représentation et les propriétés des cycles, les relations des divers coefficients qui interviennent dans la Théorie de la chaleur, et les applications des principes fondamentaux aux changements d'état, etc. Un Chapitre spécial a été consacré à la théorie des gaz, un autre à la dissolution, un troisième aux changements d'état chimiques et aux principes de la Thermochimie.

L'étude de la conductibilité calorifique a été complétée par quelques notions mathématiques générales, et par un paragraphe spécial, relatif à la conductibilité des gaz. Un Chapitre a été consacré à l'étude de la chaleur solaire.

Tome III.

Premier fascicule : *Acoustique.* — Les additions les plus importantes se rapportent à la théorie des tuyaux sonores et à la vitesse du son. (Expériences de Regnault, de M. Kœnig et de M. Kundt.)

Deuxième fascicule : *Optique géométrique.* — On y a introduit une théorie élémentaire des lentilles épaisses.

Troisième fascicule : *Étude des radiations; optique physique.* — L'étude de la chaleur rayonnante a été fondue dans la partie de l'Ouvrage consacrée à l'étude des radiations. Des compléments importants ont été ajoutés au Chapitre de l'analyse spectrale, et d'autres, moins considérables, au Chapitre de la Photométrie, à celui de la fluorescence, de la Photochimie, enfin à la mesure des indices dans les diverses régions du spectre.

L'étude de la diffraction a été complétée par un Chapitre relatif à la diffraction des ondes planes; celle de la double réfraction par une exposition plus étendue de la théorie de Fresnel, et par un Chapitre sur les cristaux à deux axes; celle de la polarisation chromatique, par l'emploi de la surface isochromatique de M. Bertin; celle de la polarisation rotatoire, par l'étude des nouveaux saccharimètres, etc. Un Chapitre nouveau a été consacré à la dispersion.

Tome IV.

Premier fascicule : *La pile. — Phénomènes électrothermiques et électrochimiques.* — Le mode d'exposition adopté dans ce Volume est entièrement nouveau. Il en est de même d'une partie notable des matières qu'il renferme.

La pile et le courant électrique sont acceptés comme des faits dont il faut découvrir les lois par l'expérience. La première de ces lois est la loi de Ohm : sa démonstration a pour corollaires les méthodes de mesure des résistances et des forces électromotrices. Viennent ensuite la loi de Joule, et l'étude des phénomènes réversibles produits par l'application de la chaleur : phénomène de Peltier, phénomènes thermoélectriques, transport électrique de la chaleur. Ces phénomènes sont rattachés les uns aux autres à l'aide du principe de la conservation de l'énergie.

L'étude de l'électrolyse conduit à celle de la polarisation. Les deux sortes de phénomènes sont rattachés entre eux par le principe de la conservation de l'énergie.

Un Chapitre spécial est consacré aux phénomènes électrocapillaires et à l'extension aux électrolytes des lois préalablement démontrées pour les conducteurs solides. La description des piles hydro-électriques complète cette partie de l'exposition.

Un dernier Chapitre se rapporte à l'étude des forces électromotrices de contact, dont l'existence, longtemps controversée, n'est nullement liée à la démonstration expérimentale des lois étudiées dans les Chapitres précédents. On a pu, sans inconvénient, se passer de cette notion pour les établir.

Deuxième fascicule : *Les aimants. — Magnétisme. — Électromagnétisme. — Induction.* — Après avoir donné, relativement aux aimants, les définitions indispensables et reconnu la loi élémentaire des actions magnétiques, on démontre les principales propriétés du potentiel magnétique, des solénoïdes et des feuillets. On établit ensuite par l'expérience l'action exercée par un courant rectiligne sur un pôle d'aimant; on s'en sert pour parvenir à l'assimilation d'un courant et d'un feuillet magnétique, et pour établir la théorie de l'électromagnétisme et de

l'électrodynamique. La méthode originale d'Ampère est exposée à part. Comme application de l'électromagnétisme, on étudie les appareils qui servent à la mesure des courants.

L'induction est rattachée à l'électromagnétisme par le principe de la conservation de l'énergie, comme on a rattaché précédemment les phénomènes thermo-électriques au phénomène de Peltier et la polarisation à l'électrolyse.

Un Chapitre spécial sur les unités électriques et magnétiques expose l'objet des systèmes de mesures électrostatiques et électromagnétiques, les lois sur lesquelles on s'appuie pour définir les unités et pour en déterminer les étalons, enfin les méthodes qui ont été employées pour en fixer la grandeur.

L'étude expérimentale du magnétisme termine ce fascicule.

La connaissance détaillée des lois de l'influence magnétique est inutile pour tout ce qui précède, tandis que l'on a besoin pour les mener à bonne fin de l'usage de tous les instruments, de la connaissance de toutes les lois étudiées précédemment. Après avoir exposé les expériences fondamentales et les principes de la théorie de Poisson, on étudie les aimants d'acier et de fer doux, puis les phénomènes généraux du magnétisme et du diamagnétisme, la polarisation rotatoire magnétique, enfin le magnétisme terrestre.

Un Chapitre final se rapporte aux théories générales : relation des phénomènes électrostatiques et électrodynamiques (Weber); relations de l'électricité et de la lumière (Théorie électromagnétique de la lumière, de Maxwell).

Troisième fascicule : *Applications de l'électricité et complément*. — Les applications de l'électricité ne sont étudiées dans cet Ouvrage qu'en ce qui les rattache aux lois générales de la Physique : trois Chapitres leur ont été consacrés et ont pour objet : le premier, l'étude des électromoteurs fondés sur l'induction ; le deuxième, la lumière électrique et la Galvanoplastie; le troisième, la Télégraphie, la Téléphonie et la Photophonie.

Le complément est surtout consacré aux découvertes réalisées pendant la publication de l'Ouvrage.

Journal de Physique théorique et appliquée,

fondé par D'ALMEIDA en 1872 (1872-1884).

Ce Journal, consacré exclusivement à la Physique, renferme l'exposition des nouvelles découvertes ou des théories récentes et peu connues.

Il publie : 1° des Mémoires originaux d'une étendue médiocre ou des résumés, rédigés par les auteurs, de Mémoires trop étendus pour trouver place dans le Journal; 2° des analyses de Mémoires publiés soit en français, soit en langue étrangère dans les divers Recueils périodiques.

Ces analyses contribuent pour une forte part à donner au *Journal de Physique* son caractère propre et son utilité. Ce ne sont pas toujours de simples résumés, mais bien souvent des expositions critiques où les méthodes et les résultats nouveaux sont discutés, comparés entre eux et aux résultats antérieurement considérés comme acquis. En un mot, chacune de ces analyses est à quelque degré une œuvre originale et personnelle.

J'ai pris part, dès la fondation, à la rédaction du Journal, soit par des articles originaux, soit surtout par des analyses. Le nombre de celles que j'ai publiées de 1872 à 1884 dépasse deux cent cinquante et leur étendue totale quatre cents pages. C'est donc près d'un Volume de l'ancien format du Journal que j'ai rédigé à moi seul.

Dès 1878, d'Almeida avait constitué un Conseil, dont je faisais partie avec MM. Cornu, Mascart et Potier, et qu'il associa à la direction scientifique du Journal. Je fus plus spécialement chargé des analyses; dès ce jour, j'ai choisi parmi les Mémoires étrangers ceux qui m'ont paru dignes d'un compte rendu, et je n'ai cessé d'être en relations suivies avec les nombreux rédacteurs qui ont bien voulu me seconder dans ce travail de classement et surtout de critique scientifique.

Depuis la mort de d'Almeida (décembre 1879), l'ancien Conseil du Journal a continué, dans le même esprit, l'œuvre du fondateur, et publié le dixième Volume qui clôt la première série du Journal, et trois Volumes d'une seconde série. J'ai été plus spécialement chargé, pen-

dant ces quatre années, de la direction journalière du Recueil, sous le contrôle de l'ancien Conseil, devenu le Comité de rédaction. Dans cet intervalle, le format de notre publication a été augmenté de moitié. Il publie actuellement chaque année quatre cents pages environ de Mémoires ou résumés originaux et plus de deux cents pages d'analyses.



TABLE DES MATIÈRES.

RECHERCHES DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE.

NOTES ET MÉMOIRES DIVERS.

OUVRAGES ET PUBLICATIONS D'ENSEIGNEMENT ET DE CRITIQUE.

10417 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55.